

---

---

# ブロードバンドワイヤレスアクセスシステムの 設計手法の確立について

富士通ネットワークソリューションズ（株）

---

## ■ 執筆者 Profile ■



丸田 晃一

- 1991年 富士通ネットワークエンジニアリング（株）入社  
多重無線システムの設計業務担当
- 1992年 無線通信技術部  
自営通信網における監視制御システムの設計業務担当
- 2001年 富士通ネットワークソリューションズ（株）へ社名  
変更
- 2011年 現在 企画開発統括部所属  
ブロードバンドワイヤレスアクセスシステム担当

## ■ 論文要旨 ■

e-Japan にはじまり、e-Japan II、u-Japan と、日本は IT 化政策を強力に推進してきた。その結果、全国的にブロードバンドインフラが急速に整備されたが、まだわずかながら、インフラ未整備の地域が残されている。

当社では、ブロードバンド環境が未整備となっている条件不利地域向けのインフラとして、5GHz 帯無線アクセスシステムが有効に活用できると考え、ラボ及びフィールド環境での検証を重ね、これらの実測データを分析することにより、当社独自の回線設計手法を確立した。

特に海上を伝搬する無線回線は、マルチパスフェージングの影響を受けやすいので、無線回線の冗長化、マルチパスを避けるアンテナの調整等、回線品質を安定させるための設計ノウハウが重要となる。本稿では、これらの回線設計手法と、海上伝搬環境下における回線品質安定化の効果について述べる。

## ■ 論文目次 ■

<b>1. はじめに</b> .....	《 3》
1. 1  当社の概要	
1. 2  背景	
<b>2. システム設計面の課題</b> .....	《 4》
2. 1  海上伝搬	
2. 2  パケットサイズ	
<b>3. システム設計手法</b> .....	《 6》
3. 1  ハイトパターンとスペースダイバーシチ	
3. 2  反射波とアンテナパターン	
3. 3  冗長構成	
<b>4. 運用面のシステム課題</b> .....	《 8》
4. 1  切替時間の短縮	
4. 2  高速化と無線回線の併設	
<b>5. おわりに</b> .....	《 9》

## ■ 図表一覧 ■

<b>図1</b> ブロードバンド基盤の整備状況 .....	《 3》
<b>図2</b> 潮位レベルとSNRの相関 (例) .....	《 4》
<b>図3</b> 無線LANのパケット伝送 .....	《 5》
<b>図4</b> マルチパスフェージングとスペースダイバーシチの概要図 .....	《 6》
<b>図5</b> アンテナパターン (例) .....	《 7》
<b>図6</b> 入射角とアンテナ利得 (例) .....	《 7》
<b>図7</b> スパニングツリーの構成概要図 .....	《 7》
<b>図8</b> ルーティングの構成概要図 .....	《 8》
<b>図9</b> ルータによるロードバランスの概要図 .....	《 9》
<b>図10</b> MSTPによるロードバランスの概要図 .....	《 9》
<b>図11</b> 片方向通信によるロードバランスの概要図 .....	《 9》
<b>図12</b> 導入事例1 .....	《 10》
<b>図13</b> 導入事例2 .....	《 10》
<b>図14</b> 導入事例3 .....	《 11》

# 1. はじめに

## 1. 1 当社の概要

当社は、ネットワークソリューションを提供する専門企業として、ユーザーの要望にあわせて、ネットワークの企画・設計から施工、運用・保守まで一貫性のあるソリューションを国内及び海外に提供している。

特にワイヤレスネットワーク分野では、BWA(Broadband Wireless Access)、地域 WiMAX 等の固定通信及び移動通信用の無線システムを自社商品としてメニュー化しており、ユーザーによるネットワーク導入時には、システム設計及びネットワークの構築、運用後のサポートに至るまで、フィールドでの豊富な経験と実績に基づいた信頼度の高い技術と対応力を強みにしている。

## 1. 2 背景

2001 年の e-Japan 戦略にはじまり、2003 年の e-Japan 戦略 II、2004 年の u-Japan 政策と、日本政府は IT 国家を目指し、政策を強力に推進してきた。これらの政策推進により、全国にブロードバンドのインフラが整備され、2011 年 3 月末におけるブロードバンド基盤の整備がほぼ完了しているが、まだ整備の完了していない地域が残っている。(図 1)。

			【2011年3月末】		
都道府県名	ブロードバンド 利用可能世帯率(%)	超高速ブロードバンド 利用可能世帯率(%)	都道府県名	ブロードバンド 利用可能世帯率(%)	超高速ブロードバンド 利用可能世帯率(%)
北海道	99.9	85.5	滋賀県	100.0	99.7
青森県	99.9	77.7	京都府	99.9	96.3
岩手県	99.4	79.3	大阪府	100.0	100.0
宮城県	99.9	91.2	兵庫県	100.0	96.6
秋田県	99.8	77.6	奈良県	99.9	99.4
山形県	99.9	81.0	和歌山県	99.9	95.7
福島県	99.7	86.6	鳥取県	100.0	86.9
茨城県	99.9	84.2	島根県	99.8	81.2
栃木県	100.0	96.6	岡山県	100.0	83.4
群馬県	100.0	93.1	広島県	100.0	88.2
埼玉県	100.0	98.4	山口県	100.0	89.3
千葉県	100.0	94.3	徳島県	100.0	98.7
東京都	100.0	99.9	香川県	99.9	79.1
神奈川県	100.0	100.0	愛媛県	99.9	90.4
新潟県	100.0	86.8	高知県	99.3	65.0
富山県	100.0	89.7	福岡県	100.0	90.1
石川県	100.0	97.8	佐賀県	100.0	85.4
福井県	100.0	92.4	長崎県	100.0	74.7
山梨県	100.0	87.1	熊本県	99.8	73.8
長野県	100.0	94.5	大分県	99.8	88.4
岐阜県	99.9	92.1	宮崎県	99.9	78.9
静岡県	99.9	85.3	鹿児島県	99.8	68.0
愛知県	100.0	99.7	沖縄県	100.0	87.3
三重県	100.0	100.0	全国	100.0	92.7

※1 ブロードバンド:FTTH、ADSL、ケーブルインターネット、第3.5世代携帯電話、地域WiMAX、FWA  
 ※2 超高速ブロードバンド:FTTH、下り伝送速度30Mbps以上のケーブルインターネット  
 ※3 小数点以下第二位を四捨五入。  
 ※4 事業者情報等から、原則町丁目単位で利用可能な有無を区分し集計を行っているため、その一部のみが利用可能である場合等、誤差が生じる場合がある。

図 1. ブロードバンド基盤の整備状況[2]

離島や山間部等、その地形的な条件から通信インフラの整備が十分に進んでいない地域は、地形的な条件からブロードバンドの整備が困難であり、また通信事業者の投資効果が出にくいいため、おもに補助金を活用してインフラ整備が進められてきた。

ブロードバンドのインフラには、FTTH、DSL、CATV、FWA、BWA が利用[1]されており、伝送媒体として、光ファイバーや同軸ケーブル等の有線システム以外に、WiMAX 等の無線システムが適用されている。

従来の無線システムは、利用目的ごとに定められた周波数帯を特定のユーザーが利用するものであり、屋外で民生利用する場合は、通信事業者から提供される無線システムを利用するか、2.4GHz帯の無線LANを構築するしかなかった。

2.4GHz帯の無線LANは無線局の開設手続きをすることなく利用できることから、様々な分野で利用されてきた。近年、通信インフラの環境が整備されており、市街地の至るところに無線LANのアクセスポイントが設置されており、増加の一途である。スマートフォンやタブレットPC等に2.4GHz帯の無線LANモジュールが標準的に搭載されていることから、至るところでインターネットを利用できるようになっている。また、2.4GHz帯は、ISMバンド(Industrial Scientific and Medical Band)で産業機器にも使用されている周波数帯である。このように2.4GHz帯は様々な無線システムが混在している周波数帯なので、干渉状況を考慮して利用する必要がある。

一方、5GHz帯無線アクセスシステムは、総務省による無線周波数の再編で民生利用が数年前に認可されたものである。汎用の無線LANより送信出力が大きく、高利得のアンテナを使用できることから、無線区間の距離が50kmを越えるような長距離伝送も可能である。ISMバンドと重ならない周波数帯なので、工場内のネットワークにも適している。様々な分野で利用できる可能性が高く、年々機種が増加していることから、市場の拡大が見込まれる。

当社では、5GHz帯無線アクセスシステムが長距離伝送可能であり、汎用の無線LAN等、他の無線システムの影響を受ける恐れが少ないことから、条件不利地域のインフラ構築に活用できると考え、ワイヤレスブロードバンドによるソリューション開発に取り組んでいる。開発を進める中で、5GHz帯無線アクセスシステムを構築するための設計手法が社内になかったため、無線装置のスペックと無線伝搬理論に基づく机上検討結果をフィールドにおける検証結果と比較検討することにより、回線設計手法の確立につなげた。

未だにブロードバンド基盤が未整備の離島において、光ファイバ網の整備は費用と時間の面で課題があり、無線回線の品質確保が困難な海上伝搬環境下である。本稿では、無線の回線設計手法を中心に、無線アクセスシステムを設計する上でのポイントについて述べる。

## 2. システム設計面の課題

5GHz帯無線アクセスシステムのフィールド検証を重ねる中で、海上伝搬における回線品質劣化という課題と、ショートパケットデータを連続送信することによる伝送効率低下という課題が浮彫りになった。それぞれの課題について、以下に述べる。

### 2.1 海上伝搬

海上伝搬の無線回線品質が不安定になる主たる要因は、電波が海面で反射することにより複数の異なる経路を経た電波が干渉するようになる現象(マルチパスフェージング)である。これにより、無線回線の受

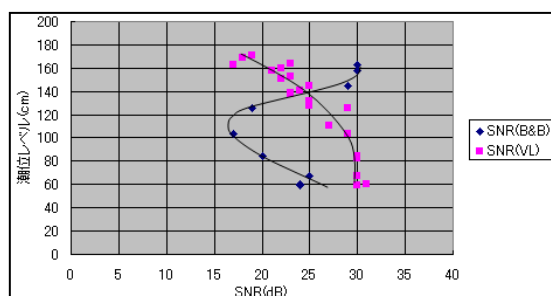


図2 潮位レベルとSNRの相関(例)

信電界強度(以下 RSSI :Received Signal Strength Indicator )及び信号対雑音比(以下 SNR:Signal Noise Ratio)が潮位に応じて変動する. 図 2 は、異なるアンテナ高に設置した無線装置の SNR と潮位変動の相関の一例である. 潮位レベルが 60cm~160cm と 1m ほど変動する環境下で、SNR が 13dB 程度変動していることを示す.

当社が提供している無線装置には SNR に応じて適切な伝送レートを選択する機能(適応変調)があるので、マルチパスフェージングの影響で SNR が変動すると無線通信の伝送レートが変化し、スループットに影響する. SNR が一定のレベルを確保できずに、無線回線が切れることもある.

海上を伝搬する無線回線の場合、波や潮位変動により反射波の伝搬路が絶えず変わり、無線回線の SNR が激しく変動する. 海面における電波の反射率は高く、直接波と反射波の受信電界強度差は小さくなるため、反射波の影響を受けやすくなる. 安定した無線回線品質を得るために、設計段階で海面の潮位変動、設置環境等の影響を考慮し、マルチパスフェージングの影響をできる限り軽減させる検討が必要である.

一方、陸上を伝搬路とする無線回線は、反射点の状態変化が少なく、反射波の伝搬路がほぼ一樣になるため、海上伝搬よりも無線回線品質が安定しやすい.

## 2. 2 パケットサイズ

5GHz 帯無線アクセスシステムのほとんどの製品は、Wi-Fi 等の無線 LAN と同じ CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance)による伝送方式を採用し、同一のチャンネルを共有して複数の端末が通信を行なう. CSMA/CA では、複数の端末からのパケット衝突を回避するための RTS/CTS( Request To Send / Clear To Send )等の制御信号を、パケット送信間隔を空けて通信している(図 3). パケットには、ユーザーデータのほかに、ヘッダーが付加されている.

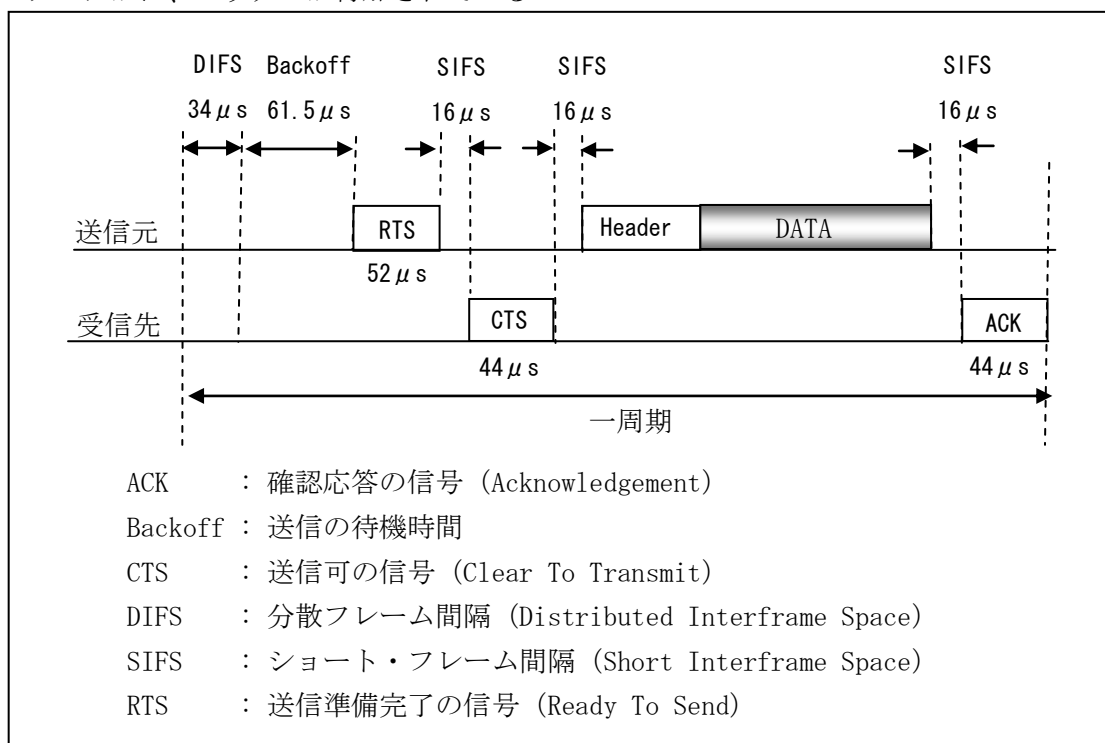


図 3 無線 LAN のパケット伝送

Ethernet で利用される代表的な通信プロトコルは、TCP(Transmission Control Protocol)と UDP(User Datagram Protocol)である。TCP は、データ送信と受信の確認応答を交互に行う通信プロトコルで信頼性が高い通信に適している。UDP は、データ受信の確認応答を行わない通信プロトコルで、伝送効率がが高く、TCP より高いスループットを得られるので、リアルタイム性が必要な映像や音声の伝送で利用されている。

無線 LAN 等で示される伝送速度は、無線の物理層における伝送速度である。前述した制御信号やヘッダーの伝送時間が必要になるため、ユーザーの実効スループットは物理層の伝送速度より低くなる。更に、VoIP のようにパケット当たりのユーザーデータ長が短い場合、パケットの送信周期におけるユーザーデータの伝送効率が低下するので、更に伝送容量が少なくなる。

パケットサイズによる伝送効率を考慮せずに、スループットとアプリケーションの所要伝送容量から、回線容量を算出すると、実回線でアプリケーションを利用できない恐れがある。アプリケーションのパケットサイズを考慮した回線容量の検討が必要になる。

### 3. システム設計手法

ここでは、5GHz 帯無線アクセスシステムにおいて、マルチパスフェージングの影響により品質が不安定になりやすい海上伝搬環境下における回線設計手法とシステム冗長構成のポイントについて述べる。

#### 3. 1 ハイパターンとスペースダイバーシティ

実際の無線回線における RSSI は直接波と反射波を合成した RSSI となるが、電波が様々な経路を通ってくることにより、双方の波の間に位相差が生じるため、受信点に依存して RSSI が大きく変化する。アンテナ高以外の通信条件が一定のときに、アンテナ高と RSSI

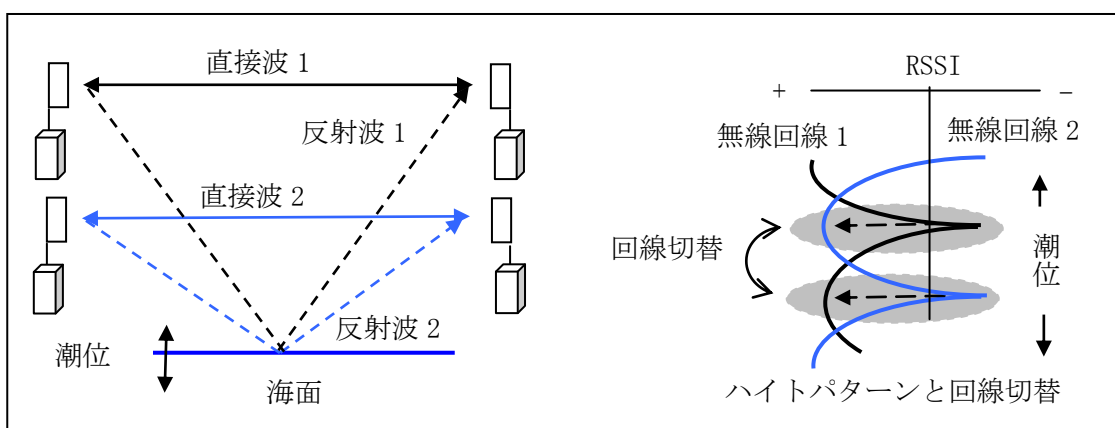


図4 マルチパスフェージングとスペースダイバーシティの概要図

の関係を示したものをハイパターンという(図4)。

ハイパターンは、周波数、伝送距離、アンテナ高から算出することができる。海上を伝搬する無線回線において、海面の潮位変動はアンテナ高の変動と見なすことができるため、ハイパターンを検討することで、適切なアンテナ高を決定できる。

アンテナ高を変えることにより、海面による反射波の位相差が変わり、RSSI が変動する。

このことを利用して、アンテナ高が異なる複数の回線を構築して冗長化をはかることでスペースダイバーシティによる改善効果が得られ、回線品質を安定させることが可能になる。

### 3. 2 反射波とアンテナパターン

アンテナの利得は、電波の入射角によって変化する。これは、アンテナが指向特性（以下アンテナパターン（図5））を有しているからであり、通常はアンテナの正面（入射角 $0^{\circ}$ ）が対向局に正対するように設置する。

無線区間の伝送距離に対し、両局のアンテナ海拔高と反射点の海拔高の高低差が少ないと、直接波と反射波の入射角の差が小さくなり、直接波と反射波のRSSI差が少なくなる。このため、直接波に与える反射波の影響が大きい。

アンテナパターンによると、アンテナ利得は電波の入射角が半値幅（最大利得から3dBダウンの角度）を超えると大きく減衰する傾向がある。つまり、アンテナの方向を上向きにずらし、直接波の入射角を半値幅内に、反射波の入射角を半値幅外になるようにアンテナ方向を調整することで、直接波のRSSIを大きく減衰させることなく、反射波の影響を軽減できる（図6）。

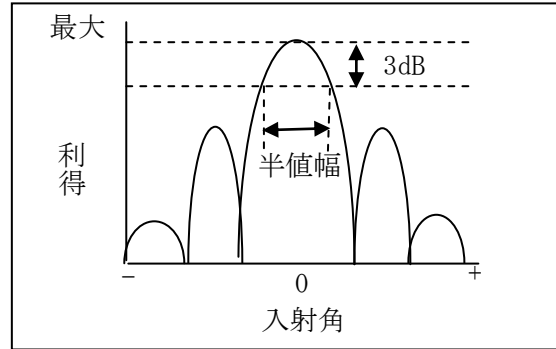


図5 アンテナパターン（例）

### 3. 3 冗長構成

スペースダイバーシティの効果を得るには、アンテナの地上高を変え、海面反射の影響が異なる複数の無線回線を構築し、対向局

と疎通のある無線回線を自動的に選択させる必要がある。ルータやスイッチを組合せることで、無線回線を切替えることができ、潮位変動による海面反射の影響を軽減できる。

以下にスイッチやルータによる冗長構成について述べる。

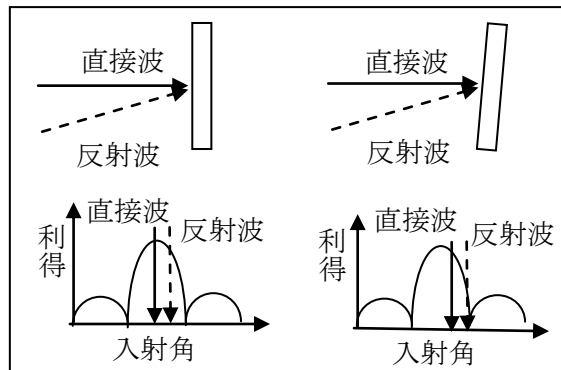


図6 入射角とアンテナ利得（例）

#### 3. 3. 1 スイッチによる冗長構成

冗長構成時に、スイッチを用いる際、ループ回避機能であるスパニングツリープロトコル（以下STP:Spanning Tree Protocol）が有効である。

STPはループ回避のプロトコルだが、通信回線の切断を検出すると、切断された回線を識別して通信経路を再構築する。これを冗長構成の無線回線に適用すると、一方の無線

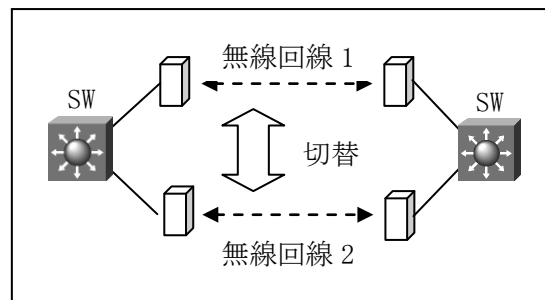


図7 スパニングツリーの構成概要図

回線が切断された際、他方の無線回線へ切替わる（図7）。

STP は、ネットワークを再構築する切替時間に 50 秒かかるが、RSTP (Rapid Spanning Tree Protocol) にすることで切替時間を 20 秒に短縮できる。

STP は、通信回線の状態を BPDU (STP Hello Bridge Protocol Data Unit)で確認している。無線回線が切断されても、Ethernet のインタフェースが機能している際、BPDU の通信が途絶えることで、スイッチは無線回線が切断されたことを検出する。しかし、ベンダーによっては、Ethernet 側のインタフェース異常のみを通信回線の切断として検出するスイッチがある。このようなスイッチは、無線回線が切断されても回線の切替が行われないため、冗長回線には使用できない。このような観点から冗長構成をとる場合は、スイッチの機種選定に注意が必要である。

### 3. 3. 2 ルータによる冗長構成

冗長構成時に、ルータを用いる際、OSPF (Open Shortest Path Fast) や EIGRP (Enhanced Interior Gateway Routing Protocol)等のルーティングプロトコルが有効である。これらのルーティングプロトコルは、Hello Packets で通信経路の疎通を確認する。

通常、ルータは Ethernet インタフェースの異常を検出して通信経路を切替える。無線回線が切断された際、通信は疎通できなくても Ethernet のインタフェースは機能している。ルータはインタフェースの異常を検出しないので、通信経路を切替えない。OSPF や EIGRP は、Ethernet のインタフェース異常のほか、Hello Packets が途切れることで、ルータが通信回線の異常を検出し他方の通信経路へ切替わる（図8）。これにより、冗長構成が実現する。

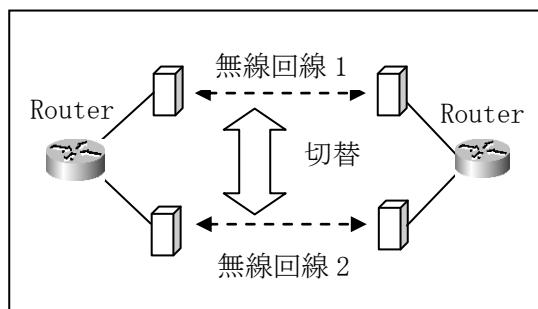


図8 ルーティングの構成概要図

## 4. 運用面のシステム課題

無線回線の回線品質を安定、維持させるという課題に対しては、これまで述べた手法により、安定した無線回線を設計することができる。一方、システム全体に目を向けた場合、考慮すべき課題が別にある。

### 4. 1 切替時間の短縮

通信経路の切替時間は、通常 OSPF が 40 秒、EIGRP が 15 秒、RSTP が 20 秒なので、一方の無線回線が切断されて、他方の無線回線に切替わるまでの数十秒間、通信が停止することになる。リアルタイム性の高い音声や映像等の通信は一時的に途切れるため、切替時間を短縮する必要がある。

切替時間を短縮する手法として、Hello packets 等の送信間隔や回線断検出までの回数を短縮する方法があるが、一定以上の検出時間を持たせないと、RSSI が限界レベル付近で細かく変動している場合に、回線の切替えと切戻しが連発する「ばたつき」状態になる可能性もある。システム全体の安定性を考慮して、切替え時間短縮の検討と評価が必要である。



る。

#### 4. 2 高速化と無線回線の併設

総務省は、超高速ブロードバンドの普及[3]を目指しており、今後もネットワークインフラの更なる高速化対応が進んでいく。

これに対し、5GHz 帯無線アクセスシステムの伝送容量は数 10Mbps であり、高速の有線ネットワークを、5GHz 帯無線アクセスシステムで中継するような場合、無線回線が、ネットワークのボトルネックになり得る。

このようなケースでは、複数の無線回線を同時に併用することで、伝送容量の増加、ネットワークの高速化が可能となる。

OSPF や EIRGP のルーティングプロトコルはロードバランスの機能をもつルーティングプロトコルなので、併設した無線回線で高速化を実現できる（図 9）。

MSTP (Multiple STP) は、VLAN のグループ（以下インスタンス）ごとに、優先する通信経路を設定できる。インスタンスごとに、優先する無線回線を設定することで、併設した無線回線で高速化を実現できる（図 10）。

これらの構成は、各無線回線を双方向通信で利用している。5GHz 帯無線アクセスシステムは CSMA/CA 方式で通信するため、双方向通信を行うと、無線区間でパケットの衝突が数%発生する。無線区間でパケットが衝突することで、パケットの再送が行われるため、パケットロス回避できるが、遅延時間、及びジッタの増大につながる。より効率的な伝送を行なうには、無線回線を片方向通信に限定する（図 11）ことで、パケットの衝突を回避でき、効率的な伝送が可能となる。

### 5. おわりに

当社では、5GHz 帯無線アクセスシステムで海上を伝搬する無線回線のシステム設計の手法を確立した。これらの成果を元に、通信距離が数 km に及ぶ離島と本土間の通信インフラとして 5GHz 帯無線アクセスシステムを納入してきた。

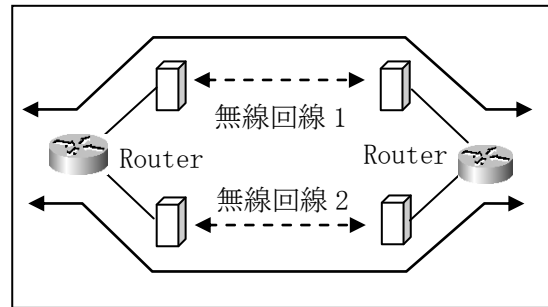


図 9 ルータによるロードバランスの概要図

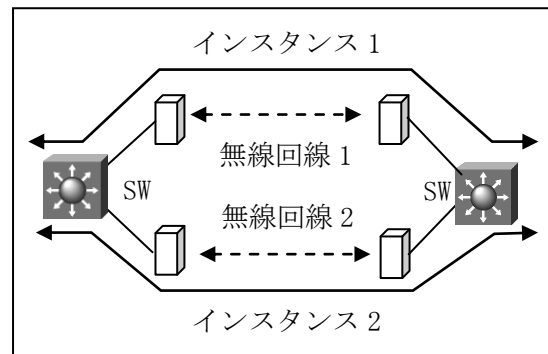


図 10 MSTPによるロードバランスの概要図

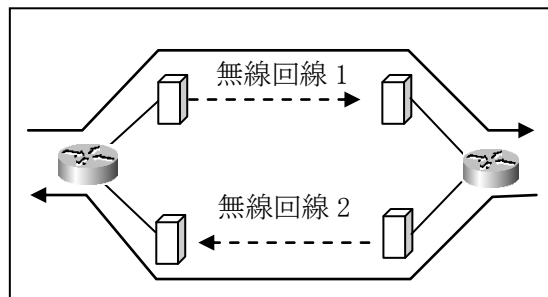


図 11 片方向通信によるロードバランスの概要図

図 12 の導入事例 1 は、本土と離島それぞれ光ネットワークを構築し、5GHz 帯無線アクセスシステムで本土と離島間のネットワークをつないだものである。無線システムを冗長構成にすることで、通信システムの高速度と安定化を実現したものである。

5GHz 帯無線アクセスシステムは、無線局開設手続きが簡易である。事前に設置場所や無線装置の仕様を特定し、認可をうける免許の手続きではなく、あらかじめ無線システムを利用するための認可を受けておき、無線局の開設後に、その旨を届け出る包括登録の手続きを利用できる。また、ISM バンド (2.4GHz 帯) の産業機器の影響を受ける恐れが無く、長距離伝送 (機種によっては 50km 程度も可) が可能なため、条件不利地域のインフラ構築のほかにも、観光地の情報カメラ、工場内の情報インフラ、中継局の映像素材伝送、臨時回線等、様々なユーザーが様々な用途で利用しはじめている。

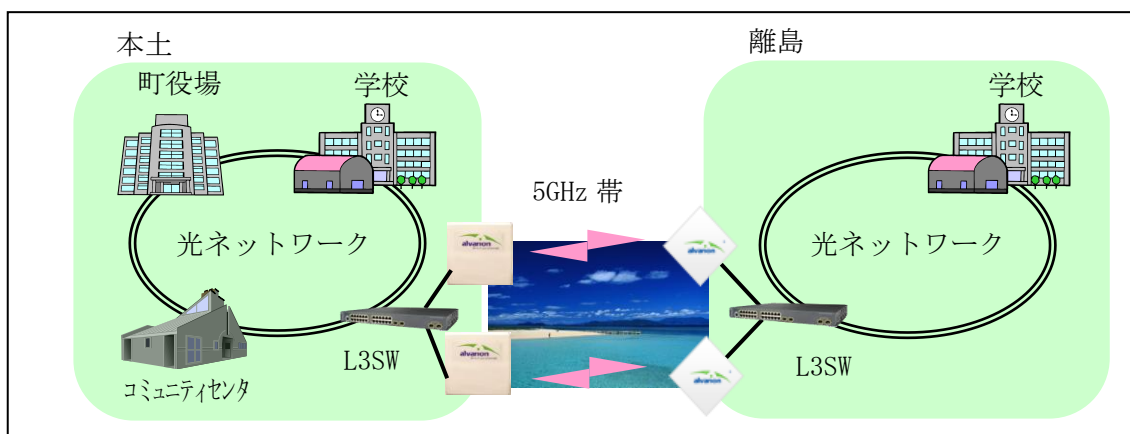


図 12 導入事例 1

図 13 の導入事例 2 は、IP カメラで写した観光地の映像をインターネットで配信するためのものである。国立公園は自然公園法で保護されており、新たな通信ケーブルを敷設することが困難である。中腹の施設まで敷設された

光ネットワークと、山頂に設置した IP カメラ間の回線に 5GHz 帯無線アクセスシステムを採用することで、容易に通信インフラを構築したものである。

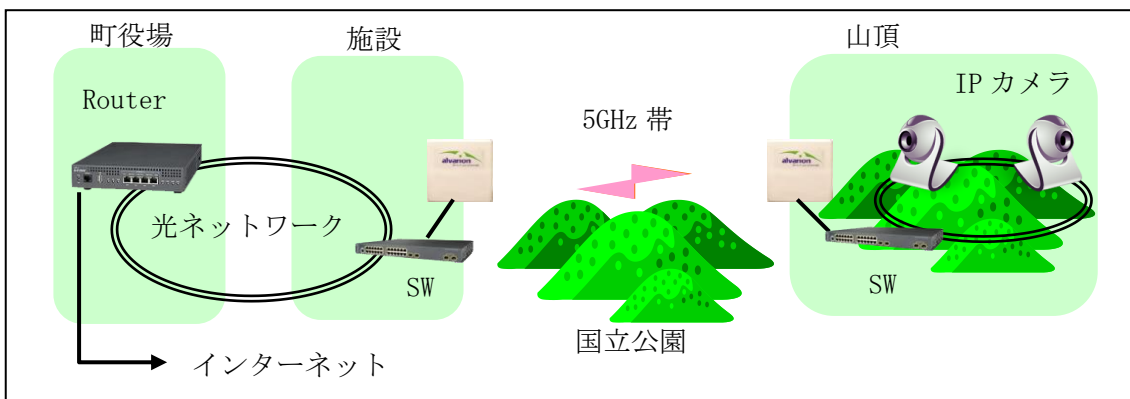


図 13 導入事例 2

図 14 の導入事例 3 (次ページ) は、IP カメラで写した工場内の製造ラインの映像を集中監視室で監視・蓄積するものである。工場内は製品ごとに製造ラインが変わるため、従来は製造ラインの変更時にケーブルを再敷設する必要があったが、5GHz 帯無線アクセスシステムを適用することで、工場内のケーブル再敷設が不要になった。更に、映像をサーバで

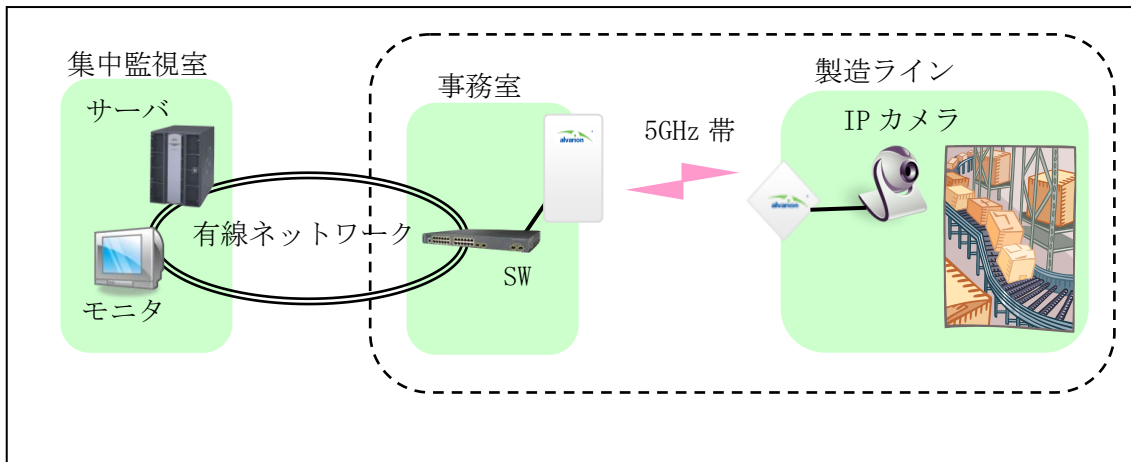


図 14 導入事例 3

蓄積することで、製造ラインの不具合調査が容易になったものである。

最近、スマートフォンやタブレット PC 等、Wi-Fi 等の無線 LAN 端末が急増しており、Wi-Fi 等の無線 LAN システムとの連携も検討されていることから、市場の拡大が見込まれる。

当社では、5GHz 帯無線アクセスシステムの無線局を開設し、フィールドにおける無線回線の評価とともに、様々なアプリケーションとの検証を行っており、システム全体を考慮して検証を行っている。

最後に、5GHz 帯無線アクセスシステムが条件不利地域をはじめとするブロードバンドインフラの整備が必要とされる地域にますます普及し、弊社の技術力が条件不利地域のブロードバンド基盤の整備に更なる貢献ができれば幸甚である。

## 参考文献

- [1] 総務省：“情報通信の現況”，平成23年版 情報通信白書，(2011.8)，PP186-200
- [2] 総務省：“(1) ブロードバンド基盤の整備状況”，ブロードバンド基盤の整備，  
[http://www.soumu.go.jp/main\\_sosiki/joho\\_tsusin/broadband/broadbandstrategy/seibi.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/broadband/broadbandstrategy/seibi.pdf)
- [3] 総務省：“ブロードバンド化に伴う電気通信事業の競争促進”，電気通信政策の推進，  
[http://www.soumu.go.jp/menu\\_seisaku/ictseisaku/denkitsushin\\_suishin/index.html](http://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/denkitsushin_suishin/index.html)
- [4] 総務省 東北総合通信局：“沿岸海域における効率的なワイヤレスブロードバンドシステムの技術的条件に関する調査検討会報告書”，(2010.3)
- [5] 総務省 沖縄総合通信事務所：“条件不利地域における安心・安全のための高速無線 LAN を活用した映像伝送の調査検討報告書”，(2009.3)
- [6] 離島等の中・長距離海上電波伝搬に適した無線アクセスシステム構築のための調査検討会：“離島等の中・長距離海上電波伝搬に適した無線アクセスシステム構築のための調査検討報告書”，(2009.3)

- [7] 5GHz帯無線アクセスシステムの長距離海上電波伝搬特性及び集中豪雨減衰に関する調査検討会：“5GHz帯無線アクセスシステムの長距離海上電波伝搬特性及び集中豪雨減衰に関する調査検討報告書”，（2010.3）
- [8] 米澤 健也，前山 利幸，岩井 誠人，原田 博司：“800MHz 帯/5GHz 帯伝搬損失比較実験と 5GHz 帯伝搬モデルの一検討”，第485回電波科学研究連絡委員会F分科会，（2004,6）
- [9] 米澤 健也，野原 光夫：“低アンテナ高送受信における 5GHz 帯伝搬損失特性”，第493回電波科学研究連絡委員会F分科会，（2005.4）